

コンクリートの高強度化

近年、「高強度コンクリート」あるいは「超高強度コンクリート」という言葉をよく耳にします。コンクリートの高強度化技術の発展はめざましく、様々な構造物において有効に活用されています。最近では、超高層建築物の増加により、超高強度コンクリートの使用も増えています。今回はコンクリートの高強度化を取り上げ、その手法、メリットなどについて述べます。

Q1

コンクリートを高強度化するためにはどうすればよいのでしょうか？

A1

コンクリートはセメントペースト中に骨材が分散した2相系の複合材料であり、その強度は主として、①セメントペーストの強度、②骨材とセメントペーストとの界面の付着強度、③骨材強度の3要因に支配されており、これらの強度を高めることが高強度化の基本条件となります。

解説

図-1に、これまでに検討されている高強度化の手法を例示します。ここでは、高強度化の基本要件である水結合材比の低減を中心に、材料的アプローチによる手法を述べます。

減水剤は今では水結合材比の低減に欠かせない材料です。特に1960年代初頭に開発されたナフタレン系の高性能減水剤は、減水率の大幅な増加をもたらして、それまでの強度レベルを一変させました。近年では減水剤によるセ

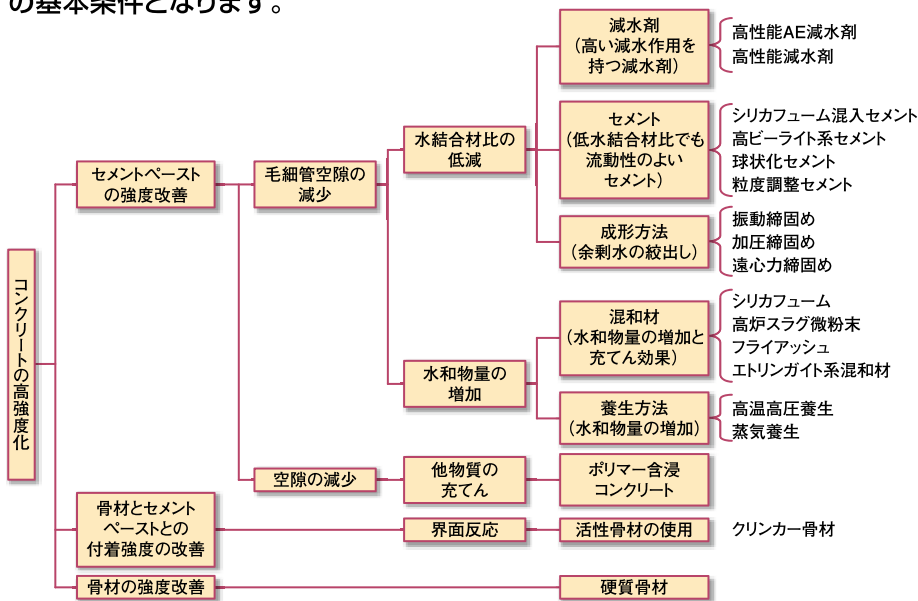


図-1 コンクリートの高強度化手法の例

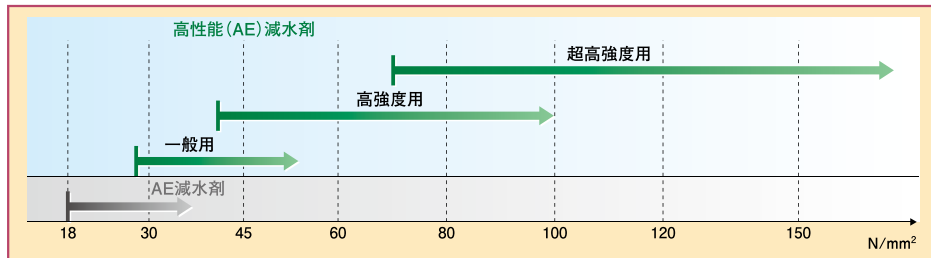


図-2 圧縮強度レベルによる減水剤使用区分のイメージ

ント粒子の分散機構の解明も進み、静電反発作用に加えて、立体障害作用による大きな分散効果を付与したポリカルボン酸系高性能(AE)減水剤が普及しています。現在では、強度レベルに応じた高性能(AE)減水剤の使い分けが一般化しており(図-2)、圧縮強度80~150N/mm²の超高強度レベルに適用できるものまで開発・改良が進んでいます。

高強度化に欠かせない混和材の代表的なものにシリカフュームがあります。シリカフュームの作用機構は、DSP(Densified System Containing Homogeneously Arranged Ultra-Fine Particles)として広く知られています(図-3)¹⁾。DSPは、高性能減水剤による粒子分散効果および微粒子による充てん効果の双方を利用した手法であり、極低水結合材比であっても流動性を確保して、セメント硬化体組織の緻

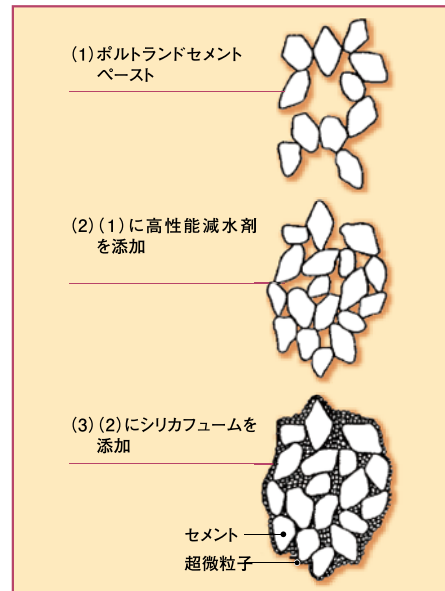


図-3 DSPの機構¹⁾

密化を可能にする技術です。最近では、流動性向上の観点より、従来の一般的なシリカフューム(BET法による比表面積:20m²/g程度)に比べて比表面積の小さいシリカフュームも着目されています。

高層鉄筋コンクリート造建築物(以下、高層RC)における設計基準強度(以下、Fc)と使用セメントの関係の例を表-1に示します。Fc80 N/mm²までのレベルでは、アルミネート量が少なくピーライト量の多い低発熱系のポルトランドセメントが広く利用されています。この種のセメントは低水結合材比における流動性の改善や水和発熱による長期的な強度増進の停滞を軽減する効果を有しています。さらに高い強度レベルになると、各種セメントとシリカフュームや高炉スラグ微粉末などの混和材を組み合わせる手法が用いられます。これらの混和材をプレミックスしたセメントも広く流通しています。Fcに対する水結合材比の概略値を表-2²⁾に示しますが、高強度コンクリートに対応したセメントを用いることで、より低水結合材比まで達成できることが理解できます。

なお、Fc120N/mm²程度までのレベルでは一般的に良質といわれる骨材が、これを超えるレベルではさらに厳選

表-1 高層RCにおけるセメントの使用区分の概略

設計基準強度 (N/mm²)	セメント種類
150~80	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム*
	普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末+シリカフューム*
	高ピーライト系セメント+シリカフューム*
	普通ポルトランドセメント+高強度混和材
80~42	低熱ポルトランドセメント
	高ピーライト系セメント
60~39	中庸熟ポルトランドセメント
50~42	普通ポルトランドセメント
	高炉セメントB種

*プレミックスセメントも市販されている

表-2 設計基準強度と水結合材比の概略値(標準養生28日強度を基にした場合)²⁾

セメントの種類	設計基準強度 (N/mm²)			
	60	80	100	120~
普通ポルトランドセメント	25~30%			
中庸熟ポルトランドセメント	28~32%	23~27%		
低熱ポルトランドセメント	28~32%	23~27%		
シリカフュームをプレミックスしたセメント		24~28%	19~21%	14~18%

された骨材が用いられ、岩種としては、硬質砂岩碎石や安山岩碎石の実績が多くなっています。

Q2

コンクリートの高強度化はどのレベルまで到達しているのでしょうか？

A2

建築分野の高層RCではFc150 N/mm²の現場打ちコンクリート(プレキャスト部材ではFc160N/mm²)まで、土木分野のPC橋梁ではFc120N/mm²まで、それぞれ実用化されています。

解説

高強度コンクリートとは、対象となる構造物、あるいは材料そのものにおいて、一般に用いられるコンクリートと比較して、高いFcを有するコンクリートの総称とされています。現在、土木学会「コンクリート標準示方書」(2007年)ではFc60~100 N/mm²、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説JASS5鉄筋コンクリート工事」(2009年)ではFc36を超え60N/mm²以下、同学会「高強度コンクリート施工指針(案)・同解説」(2005年)ではFc36を超え120N/mm²以下、プレストレストコンクリート技術協会「高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準」(2008年)ではFc60~160 N/mm²の高強度コンクリートを、それぞれ適用の対象としています。

高強度コンクリートと超高強度コンクリートの間に明確な区分はなく、技術のレベルに応じて変化していくものといえま

すが、現在では概ねFc80~100N/mm²程度を超える強度レベルを超高強度コンクリートと呼んでいるようです。

建築構造物では、1988年から5か年にわたって旧建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(New RC総プロ)が実施され、Fc120N/mm²までのコンクリートの開発が進められた結果、高層RCの分野において高強度化技術が大きく進展しました(図-4)。2000年頃よりFc100N/mm²レベルのコンクリートを用いた超高層集合住宅の建設が急増し、2004年にはFc130N/mm²のコンクリートが実施工で使用されています。現時点における実用化の強度レベルは、現場打ちコンクリートとしてはFc150N/mm²まで至っており³⁾⁴⁾、Fc160N/mm²のプレキャスト部材を用いた施工例も報告されています⁵⁾。最新のトレンドとしては、Fc 200 N/mm²レベルの実用化研究も活発化しています。

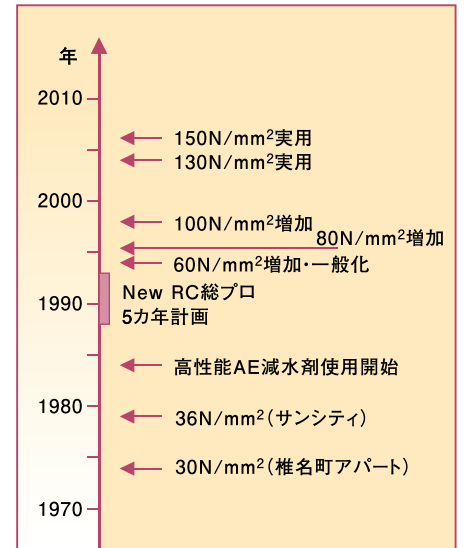


図-4 高層RCにおける高強度コンクリート(現場打ち)の変遷

Fc36N/mm²を超える高強度コンクリートが採用された建築物の構造評定・評価取得件数を図-5に示します²⁾。Fc60N/mm²を超える建築物の占める割合は、1998年以降着実に増加しており、さらに最近ではより高強度なコンクリートが使用されてきていることが理解できます。

土木構造物では、高強度コンクリート技術はプレストレストコンクリート(以下、PC)構造である橋梁やタンク、オートクレープ養生などの特殊な促進養生を行うPCパイルなどのコンクリート工場製品を中心に発展してきました。パイルの分野では、Fc105N/mm²あるいはFc123N/mm²といった製品が開発されており、設計上必要とされる軸力に応じて実用化されています。

橋梁を中心とする一般のPC構造物では、旧建設省でのFc80N/mm²の高強度コンクリート利用技術の試験フィールド制度により、1998年頃より複数の橋梁が施工され(図-6)⁶⁾、現時点ではFc120N/mm²まで実用化されています⁷⁾⁸⁾。また近年では、200N/mm²以上の圧縮強度と繊維補強による高靱

性を有した新しいセメント質複合材が開発されており、この技術を用いた幾つかの橋梁が施工されています。この材料は、超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete、以下UFC)と呼ばれており、土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」(2004年)が発刊されています。UFCについては、「CEM'S質問箱第23回」で紹介されていますのでご参照下さい。

Q3

コンクリートの高強度化によるメリットは何でしょうか?

A3

コンクリートを高強度化して構造物に適用することにより、部材断面の縮小、部材の軽量化、支間の長大化、低桁高化、さらには耐久性の向上などが図れ、付加価値の高い構造物や経済的な構造物の実現が可能になります。

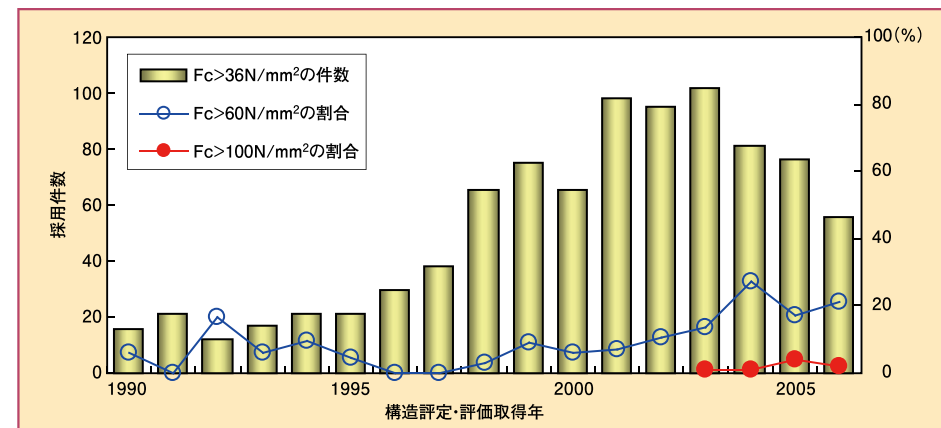


図-5 高強度コンクリートが採用された建築物におけるFcの推移²⁾を基に作成

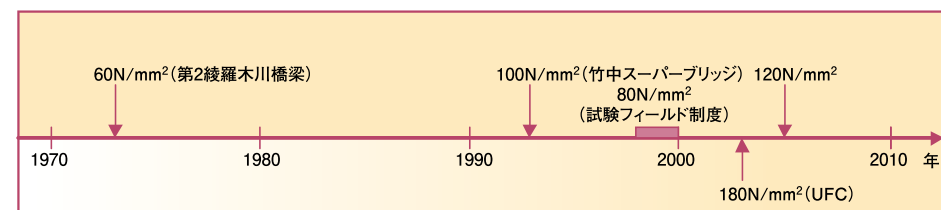


図-6 プレストレストコンクリート橋梁主桁部における高強度コンクリートの変遷⁶⁾を基に作成

解説

コンクリートを高強度化することにより、圧縮力を受け持つコンクリート部材断面を縮小することができ、部材の軽量化が図れます。柱部材に高強度コンクリートを使用する建築物の代表例である高層RCについて、コンクリートの強度区分のイメージを図-7に示します。低層になるほどより高強度なコンクリートを用いることで、柱の断面寸法を一定の大きさに収めることができます。高強度コンクリートの適用により、広く自由度の高い快適な空間の実現が可能になります。

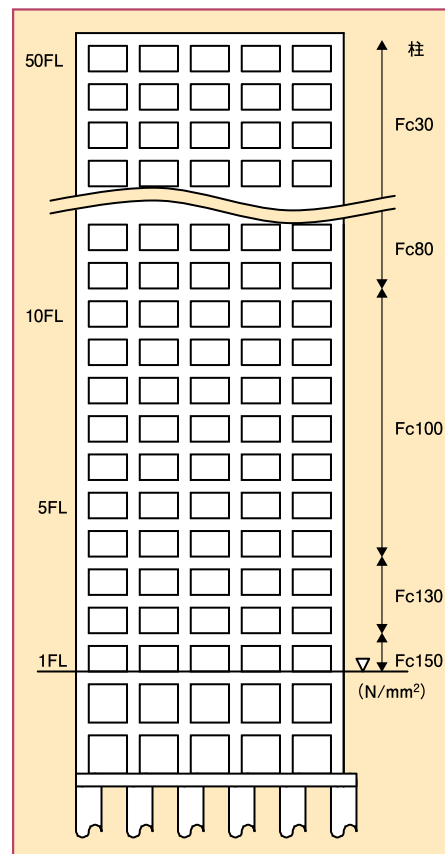


図-7 高層RCにおけるコンクリートの強度区分のイメージ

橋梁では、桁部材など上部工への適用が中心となっています。高強度コンクリートを用いたPC桁橋(道路橋)における設計基準強度と支間-桁高比の関係を図-8に示します⁶⁾。高強度化するほど大きなプレストレスを導入でき、支間-桁高比を大きくすることができます。同一支間では桁高を低減することができ、

部材の軽量化や下部工の簡素化につながるので、建設コスト削減の効果も期待できます。

最近では、強度面や建設コスト削減の観点からだけでなく、高耐久性やメンテナンスフリーによる経済性から、高強度コンクリートが用いられることも少なくありません。PC桁橋のライフサイクルコ

スト(以下、LCC)を試算した例を図-9に示します。鋼材の発錆限界塩化物イオン濃度に着目した検討の結果、高強度コンクリート(Fc120N/mm²)を使用することで、普通強度コンクリート(Fc50N/mm²)の場合と比較して、初期建設コストは増加しますが、LCCは大幅に抑制されることが分かります⁶⁾。

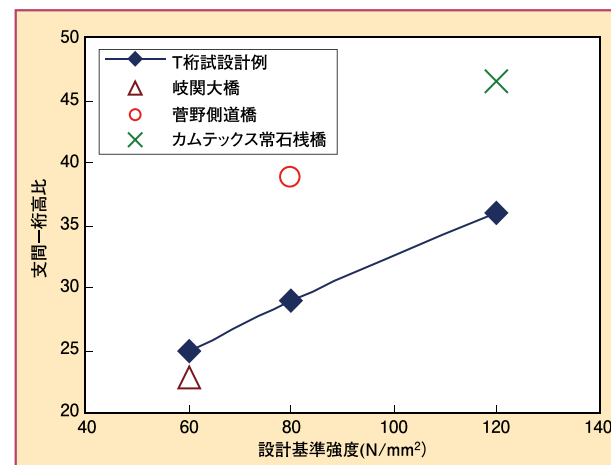


図-8 PC桁橋(道路橋)における設計基準強度と支間-桁高比の関係⁶⁾を基に作成

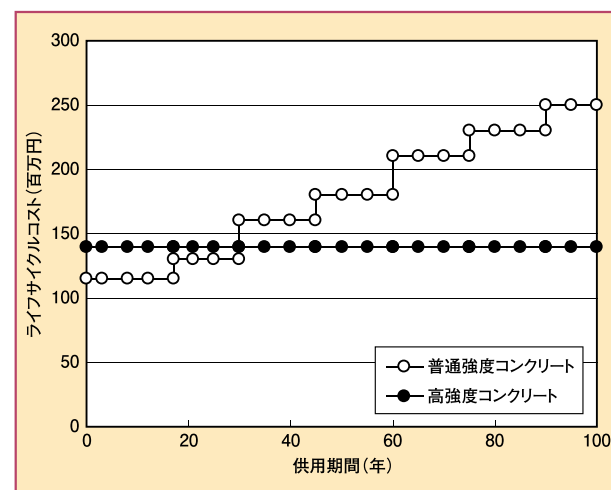


図-9 LCCの算出結果例⁶⁾

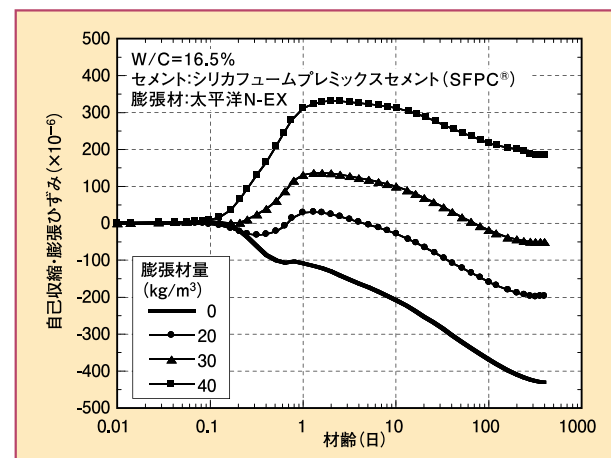


図-10 膨張材による自己収縮低減効果

なお、コンクリートの高強度化に伴う課題として、自己収縮が大きくなることが挙げられます。この対策として、材料的アプローチによる自己収縮制御の検討が広く行われており、例えば膨張材の混和によって自己収縮が大幅に低減されることが検証されています(図-10)。自己収縮および膨張材については、「CEM'S質問箱第20回」および「第18回」でそれぞれ記述されていますので、そちらもご参照下さい。

太平洋セメント株式会社中央研究所

技術企画部TBCチーム

前堀 伸平

【参考文献】

- 1) Bache, H.H.: Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based materials, Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, 1981
- 2) 日本建築学会:高強度コンクリートの技術の現状(2009)
- 3) 陣内ら:設計基準強度150N/mm²の低収縮型超高強度コンクリートの製造と施工,セメント・コンクリート,No.723,pp.18-24,2007
- 4) 三井ら:設計基準強度150N/mm²超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工,セメント・コンクリート,No.723,pp.25-31,2007
- 5) 陣内ら:設計基準強度160N/mm²の高強度プレキャストコンクリートの製造と施工-東池袋四丁目第2地区市街地再開発-,セメント・コンクリート, No.755,pp.27-32,2010
- 6) プレストレストコンクリート技術協会:高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準,2008
- 7) 岡本ら:低収縮型高強度コンクリートのPC橋への適用-秋葉原公共デッキ-,プレストレストコンクリート,Vol.48,No.1,pp.28-33,2006
- 8) 桜田ら:高強度繊維補強モルタルを使用したPC構造物,コンクリート工学,Vol.45,No.7,pp.46-53, 2007